

SiGe混晶基板を利用した歪み制御Si系高機能電子デバイスに関する研究

著者	宇佐美 徳隆
URL	http://hdl.handle.net/10097/45461



SiGe 混晶基板を利用した
歪み制御 Si 系高機能電子デバイスに関する研究

研究課題番号 13555086

平成 13 年度～平成 14 年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）

研究成果報告書

平成 15 年 3 月

研究代表者 宇佐美 徳隆

(東北大学金属材料研究所助教授)

はしがき

本報告書は、平成 13～14 年度の 2 年間にわたり、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)課題番号 13555086）を受けて行われた「SiGe 混晶基板を利用した歪み制御 Si 系高機能電子デバイスに関する研究」に関連する研究成果をまとめたものである。

Si 系半導体の分野では、微細化・集積化による電子デバイスの高性能化が限界を迎えつつある状況から、高度に発達したエピタキシャル成長技術を利用し、Si と同じ IV 族材料から成る混晶半導体とのヘテロ構造による電子帯制御・物性操作など、新しい概念を取り入れることが緊急に必要であると考えられている。IV 族混晶の中で、全率固溶型の状態図を有する SiGe 混晶が、ヘテロ構造の構成物質として古くから注目されているが、多くのデバイスが既に実用化されている化合物半導体ヘテロ構造と大きく異なる点は、SiGe/Si 系が格子不整合系であり、成長した薄膜が「歪み」を内包することである。「歪み」は、転位発生や成長モード遷移の臨界膜厚を考慮する必要性など、物質設計や結晶成長の障害となる側面も持つが、電子帯制御や新機能発現に積極的に利用することもできる。一例を挙げると、歪み緩和した SiGe 混晶(Si よりも大きな格子定数を持つ)上に結晶成長した、引っ張り歪み Si 薄膜においては、n 型の変調ドーピングを施すことにより Si/SiGe 界面に二次元電子ガスを形成することが可能であり、歪みに起因したバンド分裂によるバンド間散乱の低減、有効質量の減少などの効果も重なり、無歪み Si を凌駕する超高速移動度を実現できることが期待できる。Si 系電子デバイスのプロセス技術は、既に確立されているので、「歪み」制御の利点を十分に生かした高機能 Si 系半導体の実現とデバイス応用のためには、無歪みの SiGe 結晶を任意の組成において実現する成長技術が基盤技術として重要となっている。

このような背景に基づき、本研究においては、溶質元素補給機構と成長界面温度の精密な制御機構を併せ持つ新たな結晶成長技術により、組成均一性の極めて優れた SiGe バルク単結晶を作製し、デバイス作製用の SiGe 基板を供給すること、および分子線エピタキシー法による SiGe 基板上へのエピタキシャル成長により、優れた電子物性を有する歪み制御 Si 系ヘテロ構造を実現することを目的として研究を遂行した。

SiGe バルク結晶成長においては、「その場観察」により取り込んだ成長界面近傍の画像から、界面位置を自動認識し、常に固液界面位置（すなわち固液界面温度）を一定に保つように結晶の引き下げ速度をフィードバック制御するシステムの開発を行い、結晶成長に適用することにより、極めて組成均一性に優れた SiGe バルク結晶を実現することに成功した。

また、SiGe バルク結晶の良質化のために、バルク結晶成長時において、成長界面近傍の温度勾配を系統的に変化させて結晶成長を行ったところ温度勾配の増加とともに、半値幅が減少し、回折強度が増加することが明らかになった。これは、急峻な温度勾配を用いることにより多結晶化の原因の一つである組成的過冷却を抑制できたことに起因すると思われる。

これらの成果に加えて、次世代トランジスタの材料としての期待が大きい、絶縁体上への SiGe 薄膜単結晶の作製にも取り組んだので併せて報告する。今後、これらの研究を更に発展させ、高機能電子デバイス開発へと展開していく。

平成 15 年 3 月

宇佐美 徳隆

研究組織

研究代表者：宇佐美 徳隆 (東北大学金属材料研究所助教授)
研究分担者：中嶋 一雄 (東北大学金属材料研究所教授)
研究分担者：中川 清和 (山梨大学クリスタル科学研究センター教授)
研究分担者：黄 晋二 (東京大学大学院工学系研究科助手)
研究分担者：佐崎 元 (東北大学金属材料研究所講師)
研究分担者：宇治原 徹 (東北大学金属材料研究所助手)
研究分担者：藤原 航三 (東北大学金属材料研究所助手)

研究協力者：白木 靖寛 (東京大学大学院工学系研究科教授)
研究協力者：張 守進 (台湾成功大学・工学部・教授)
研究協力者：我妻 幸長 (東北大学理学研究科大学院学生)
研究協力者：沓掛 健太郎 (東北大学理学研究科大学院学生)
研究協力者：澤野 憲太郎 (東京大学工学系研究科大学院学生)

交付決定額

平成 13 年度	10,500 千円
平成 14 年度	2,800 千円
計	13,300 千円

研究発表

1. 学会誌等

- (1) N. Usami, M. Miura, Y. Ito, Y. Araki, K. Nakajima, and Y. Shiraki
“Modification of the growth mode of Ge on Si(100) in the presence of buried Ge islands”
J. Cryst. Growth **227-228**, 782-785 (2001).
- (2) N. Usami, Y. Azuma, T. Ujihara, G. Sazaki, K. Nakajima, Y. Yakabe, T. Kondo, K. Kawaguchi, S. Koh, Y. Shiraki, B. P. Zhang, Y. Segawa, and S. Kodama
“Molecular beam epitaxy of GaAs on nearly lattice-matched SiGe substrates grown by the multicomponent zone-melting method”
Semicon. Sci. Technol. **16** 699-703 (2001).
- (3) K. Kawaguchi, Y. Shiraki, N. Usami, J. Zhang, N. J. Woods, G. Breton, and G. Parry
“Fabrication of strain-balanced Si/Si_{1-x}Ge_x multiple quantum wells on Si_{1-y}Ge_y virtual substrates and their optical properties”
Appl. Phys. Lett. **79**, 344-346 (2001).
- (4) G. Sazaki, Y. Azuma, S. Miyashita, N. Usami, T. Ujihara, K. Fujiwara, Y. Murakami, and K. Nakajima
“In-situ monitoring system of the position and temperature at the crystal-solution interface”
J. Crystal Growth **236**, 125-131 (2002).
- (5) N. Usami, Y. Azuma, T. Ujihara, G. Sazaki, K. Fujiwara, Y. Murakami, and K. Nakajima
“Fabrication of SiGe bulk crystals with uniform composition as substrates for Si-based heterostructures”
Mat. Sci. Eng. **B89**, 364-367 (2002).
- (6) K. Nakajima, T. Kusunoki, Y. Azuma, N. Usami, K. Fujiwara, T. Ujihara, G. Sazaki, and T. Shishido
“Compositional variation in Si-rich SiGe single crystals grown by multi-component zone melting method using Si seed and source crystals”, J. Crystal Growth **240**, 373-381 (2002).
- (7) A. V. Nobikov, B. A. Andreev, N. V. Vosotokov, Yu. N. Drozdov, Z. F. Krasilnik, D. N. Lobanov, L. D. Moldavskaya, A. N. Yablonskiy, M. Miura, N. Usami, Y. Shiraki, M. Ya. Valakh, N. Mestres, and J. Pascual
“Strain-driven alloying: effect on sizes, shape and photoluminescence of GeSi/Si(001) self-assembled islands”
Mat. Sci. and Eng. **B89**, 62-65 (2002).
- (8) Y. Azuma, N. Usami, T. Ujihara, K. Fujiwara, Y. Murakami, and K. Nakajima
“Growth of SiGe bulk crystal with uniform composition by utilizing feedback control system of the crystal-melt interface position for precise control of the growth temperature”
J. Cryst. Growth **250**, 298-304 (2003).
- (9) K. Kutsukake, N. Usami, K. Fujiwara, T. Ujihara, G. Sazaki, K. Nakajima, B. P. Zhang, and Y. Segawa
“Fabrication of homogeneous SiGe-on-insulator through thermal diffusion of Ge on Si-on-insulator substrate”
Jpn. J. Appl. Phys. **42**, L232-L234 (2003).

(10) K. Sawano, K. Arimoto, Y. Hirose, S. Koh, N. Usami, K. Nakagawa, T. Hattori and Y. Shiraki
“Planarization of SiGe virtual substrates by CMP and its application to strained Si modulation-doped
structures”
J. Cryst. Growth **251** 693-696 (2003).

2. 口頭発表

国際会議

- (1) N. Usami, Y. Azuma, T. Ujihara, G. Sazaki, K. Fujiwara, Y. Murakami, and K. Nakajima
“Fabrication of SiGe bulk crystals with uniform composition as substrates for Si-based heterostructures”
European Materials Research Society 2001 Spring Meeting, Strasbourg, France, June 4-8 (2001).
- (2) Y. Azuma, N. Usami, T. Ujihara, G. Sazaki, K. Fujiwara, Y. Murakami, and K. Nakajima
“Realization of SiGe bulk crystal with compositional uniformity over 20mm by controlling the growth temperature utilizing in situ monitoring system”
Thirteenth International conference on Crystal Growth in Conjunction with the Eleventh International Conference on Vapor Growth and Epitaxy, July 30-August 4 (2001).
- (3) N. Usami, Y. Azuma, T. Ujihara, G. Sazaki, K. Fujiwara, and K. Nakajima
“Optical and structural characterizations of SiGe bulk crystal grown by the multicomponent zone-melting method as a substrate for strain-controlled Si-based functional films”
Thirteenth International Conference on Crystal Growth in Conjunction with the Eleventh International Conference on Vapor Growth and Epitaxy, July 30-August 4 (2001).
- (4) G. Sazaki, Y. Azuma, N. Usami, T. Ujihara, K. Fujiwara, S. Miyashita, and K. Nakajima
“In-situ monitoring system of the position and temperature at the crystal-solution interface”
Thirteenth International Conference on Crystal Growth in Conjunction with the Eleventh International Conference on Vapor Growth and Epitaxy, July 30-August 4 (2001).
- (5) K. Nakajima, Y. Azuma, N. Usami, T. Ujihara, G. Sazaki, K. Fujiwara, Y. Murakami, and T. Shishido
“Growth of SiGe bulk crystal with compositional uniformity over 20mm by controlling the growth temperature utilizing *in situ* monitoring system”,
Thirteenth American Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Burlington, Vermont, USA, August 12-16 (2001).
- (6) N. Usami, Y. Azuma, T. Takahashi, K. Fujiwara, T. Ujihara, G. Sazaki, Y. Murakami, K. Nakajima, “Control of the compositional distribution of SiGe bulk crystal for ptoelectronic Applications”, in The 17th Korean Association of Crystal Growth Fall meeting, Hanseo University, Seosan, Korea, November 8-10 (2001).
- (7) K. Hayashi, Y. Takahashi, E. Matsubara, K. Nakajima and N. Usami
“3D atomic imaging of SiGe system by x-ray fluorescence holography”
The 4th International Conference on Materials for Microelectronics and Nanoengineering”, Finland, 10-12 June (2002).
- (8) N. Usami, K. Kutsukake, Y. Azuma, K. Fujiwara, T. Ujihara, G. Sazaki, Y. Murakami, K. Nakagawa, and K. Nakajima
“Fabrication of SiGe substrate with uniform composition and its application to strain-controlled epitaxy for group-IV heterostructures”
The second international workshop on new group-IV semiconductors, Kofu, Japan, June 2-4 (2002).
- (9) N. Usami, Y. Azuma, K. Fujiwara, T. Ujihara, G. Sazaki, Y. Murakami, and K. Nakajima
“Growth of SiGe bulk crystal with uniform composition by utilizing in situ monitoring of the crystal-solution interface”
First International Symposium on Crystal Science and Technology, Yamanashi Univ., Kofu, Japan, June 5 (2002).

(10) K. Sawano, K. Arimoto, Y. Hirose, S. Koh, N. Usami, K. Nakagawa, T. Hattori, and Y. Shiraki
“Planarization of SiGe virtual substrates by CMP and its application to strained Si modulation-doped structures”

International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE-XII), San Francisco, USA, 15-20 September (2002).

(11) K. Kutsukake, N. Usami, T. Ujihara, K. Fujiwara, G. Sasaki, K. Nakajima, B. P. Zhang, and Y. Segawa

“Fabrication of SiGe-on-insulator by rapid thermal annealing of Ge thin film on Si-on-insulator substrate”

First International SiGe Technology and Device Meeting, Nagoya, Japan, 15-17 January (2003).

(12) N. Usami, K. Kutsukake, K. Fujiwara, T. Ujihara, G. Sasaki, S. Ito, B. P. Zhang and K. Nakajima

“Impact of the annealing temperature on the homogeneity of SiGe-on-insulator”

The Third International Conference on SiGe(C) Epitaxy and Heterostructures, Santa Fe, New Mexico, U.S.A, March 9-12 (2003).

国内会議

- (1) 杓掛 健太郎 宇佐美 徳隆、宇治原 徹、佐崎 元、藤原 航三、張 保平、白木靖寛、中嶋 一雄

「アモルファス層の再結晶化による絶縁体上 SiGe 仮想基板の作成」

第 49 回応用物理学関係連合講演会、2002 年 3 月 27-30 日、東海大学

- (2) 杓掛 健太郎、宇佐美 徳隆、宇治原 徹、佐崎 元、藤原 航三、張 保平、中嶋 一雄

「急速アニールを利用した絶縁体上の SiGe 薄膜の作成」

第 63 回応用物理学会学術講演会、2002 年 9 月 24-27 日、新潟大学

- (3) 澤野 憲太郎、宇佐美 徳隆、小澤 優介、有元 圭介、廣瀬 佳久、黄 晋二、中川清和、服部 建雄、白木 靖寛

「空間分解ラマン分光法による SiGe 緩和バッファ層の歪み分布測定」

第 63 回応用物理学会学術講演会、2002 年 9 月 24-27 日、新潟大学

- (4) 中嶋 一雄、宇治原 徹、宇佐美 徳隆、藤原 航三、佐崎 元、宍戸 統悦

「SiGe/Si ヘテロ構造の成長モード状態図の計算」

第 50 回応用物理学関係連合講演会、2003 年 3 月（神奈川大学）

- (5) 我妻 幸長、宇佐美 徳隆、宇治原 徹、佐崎 元、藤原 航三、村上 義弘、中嶋 一雄

「SiGe バルク結晶成長時における面方位揺らぎの抑制」

第 50 回応用物理学関係連合講演会、2003 年 3 月、神奈川大学

- (6) 杓掛 健太郎、宇佐美 徳隆、宇治原 徹、藤原 航三、佐崎 元、張 保平、中嶋 一雄

「絶縁体上薄膜 SiGe 結晶性の熱処理前 Ge 成長温度および熱処理温度依存性」

第 50 回応用物理学関係連合講演会、2003 年 3 月、神奈川大学

- (7) Arnold Alguno, Noritaka Usami, Kozo Fujiwara, Toru Ujihara, Gen Sazaki, Yasuhiro Shiraki, and Kazuo Nakajima

“Enhanced absorption performance of solar cell in the infrared regime utilizing Ge quantum dots stacked in a multi-layer structure”

第 50 回応用物理学関係連合講演会、2003 年 3 月、神奈川大学

- (8) 有元 圭介、布留川 大輔、中川 清和、澤野 憲太郎、黄 晋二、白木 靖寛、宇佐美 徳隆

「空間分解ラマン分光法を用いた微細歪み Si 素子の歪み緩和の検討」

第 50 回応用物理学関係連合講演会、2003 年 3 月、神奈川大学

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録しておりません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。